Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 35, 4, 2023. (33-46)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Investigating the Impact of the Catalyst Granule Size on the Performance of Catalytic Hydrazine Thruster Decomposition Chamber

Research Article

MohammadReza Salimi[1], Hadiseh Karimaei[2], Mostafa Gholampour Yazdi[3]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.76821.1121

1. Introduction

Most spacecraft such as rockets, satellites, and space probes have small propulsion systems for situation control, orbital transfer, and position correction. Among these propulsion systems, there are monopropellant thrusters, which are a branch of liquid chemical thrusters, and due to the amount of thrust force and special impact, are mostly used in space missions. The main components of these thrusters include a pressure tank, a monopropellant tank, an injector, a thrust chamber, and a nozzle. The general performance of these thrusters is this way: the liquid propellant after leaving the tank is injected onto the catalyst bed by an injector. The monopropellant is decomposed by an exothermic reaction into hot gaseous products by passing through the catalyst bed, and finally, the resulting hot gases generate the thrust force by passing through a convergent-divergent nozzle.

In this study, the decomposition chamber of a hydrazine monopropellant thruster was numerically simulated at the scale of the granules forming the catalyst bed. Then, the impact of the diameter of the catalyst granules on the performance of the decomposition chamber is investigated. For this purpose, simulations were carried out for catalyst granules with different diameters and with specific porosity coefficient and inlet pressure of the chamber. Then, the impacts of the diameter of the catalyst granules on the performance parameters of the catalyst bed such as the mass flow rate, mass fraction of hydrazine, and the temperature of the outer wall of the bed, changes in the pressure, and pressure drop of the bed were studied. Reviewing the papers and researches conducted in the field of studying the behavior of the hydrazine thruster decomposition chamber showed that in all the studies, the porous medium has been modeled. The innovation of this research is in the numerical simulation of the decomposition chamber of a monopropellant hydrazine propellant, at the scale of the granules forming the catalyst bed. At the pore-scale simulation, no simplified model is included and therefore it has high accuracy.

2. Governing equations

It is assumed that chemical reactions are carried out in the vicinity of the catalyst. Therefore, gas phase reactions are ignored. Now, due to the very low permeability of the catalyst granules, the mass and heat transfer in the catalyst granules are considered to be completely diffusive. Therefore, the mass and energy transfer equations inside the catalyst are written as follows.

$$\frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)=\dot{\omega}_k \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial h}{\partial x_i}+\mu\left(\frac{1}{Sc}-\frac{1}{Pr}\right)\sum_{k=1}^{N}h_k\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) \tag{2}$$

3. Modelling

The catalyst bed in this research for the decomposition of hydrazine monopropellant consists of alumina granules coated with active metal iridium. The schematic of the studied catalyst bed can be seen in Figure 1.

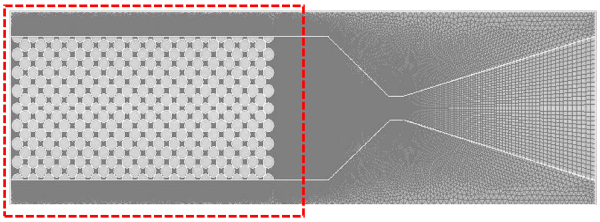


Figure 1. Schematic of the catalyst bed

Simulations were done for catalyst granules with diameters of 0.88, 1 and 1.15 mm and with a porosity coefficient of 0.4. The inlet pressure to the decomposition chamber was also considered to be 15 bar.

*Manuscript received: May 22, 2022. Revised, November 6, 2022, Accepted, June 25, 2023.

[1]. Aerospace Research Institute, Ministry of Research Science and Technology.

[2]. Corresponding author. Assistant professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Research Science and Technology, **Email**: karimaei@ari.ac.ir,

[3]. Aerospace Research Institute, Ministry of Research Science and Technology.

4. Results and discussion

Figure 2 shows the quantitative comparison of hydrazine mass fraction profiles. At the porosity coefficient of 0.4, with the increase in the diameter of the catalyst granules, due to the increase in the contact surface, the mass fraction of hydrazine at the end of the bed decreased slightly. The decomposition of hydrazine is controlled according to the transfer rate of hydrazine to the catalyst granules, because it decomposes quickly upon reaching the surface of the catalyst. The mass fraction of hydrazine also decreases exponentially along the length of the catalyst bed.

With the increase in the diameter of the catalyst granules, due to the increase in the contact surface and as a result of the increase in the resistance of the porous medium, the pressure drop also increased. Increasing the pressure drop through the catalyst bed will have adverse effects on the performance of a monopropellant hydrazine thruster. Due to the pressure drop, the catalyst granules that are located at the end of the catalyst bed are mechanically broken, which will reduce the working life of the thruster. Table 1 shows the pressure drop changes. By reducing the diameter of the catalyst granules, due to the reduction of the resistance of the porous medium, the amount of pressure drop also decreases.

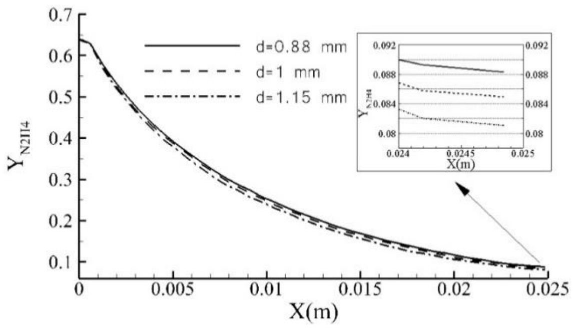


Figure 2. Mass fraction of hydrazine at the porosity coefficient of 0.4 with different granule sizes at the chamber inlet pressure of 15 bar

Table 1. Pressure drop at the end of the catalytic bed at the porosity coefficient of 0.4 and different granule sizes with chamber inlet pressure of 15 bar

Diameter of catalyst granules (mm)	Pressure at the end of the bed (bar)
0.88	9.28
1	8.23
1.15	6.46

Table 2 shows the mass flow rate changes. With the increase in the diameter of the catalyst granules, due to the increase in the resistance of the porous medium and as a result, the more pressure drop, the mass flow rate decreased. Decreasing the mass flow rate increases the resident time, which ultimately leads to an increase in the decomposition of hydrazine and an increase in the temperature.

In the process of catalytic decomposition of hydrazine in a monopropellant thruster, at the beginning of the decomposition chamber, the heat resulting from the decomposition of hydrazine is more than that of ammonia decomposition, and therefore the reaction will be exothermic. As long as the endothermic decomposition of ammonia controls the reaction, the temperature of the bed will increase. After that, the temperature will decrease in the area dominated by ammonia decomposition.

To design the thruster structure, it is very important to determine the thickness and material of the wall. For this purpose, it is necessary to determine the outer wall temperature along the thruster. Figure 3 shows the temperature changes of the outer wall up to about 5%. The maximum temperature of the outer wall is in the case of using granules with a larger diameter. The reason for this issue is the increase in the contact surface of granules with a larger diameter and more decomposition of hydrazine and the increase in the bed temperature.

Table 2. Mass flow rate at the porosity coefficient of 0.4 and different granule sizes with chamber inlet pressure of 15 bar

Diameter of catalyst granules (mm)	Mass flow rate (kg/s)
0.88	0.0023
1	0.0021
1.15	0.0017

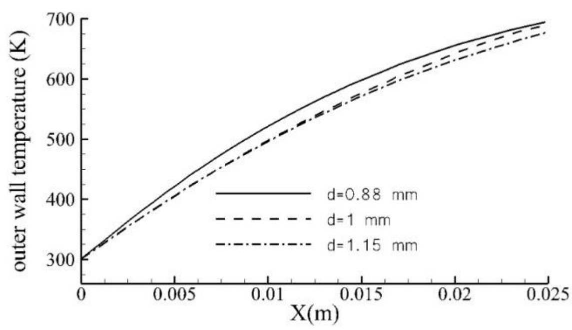


Figure 3. The temperature changes of the outer wall at the porosity coefficient of 0.4 and different granule sizes with chamber inlet pressure of 15 bar

5. Conclusion

In this study, the decomposition of hydrazine on a catalyst bed consisting of alumina granules coated with active metal iridium in a monopropellant thruster was analyzed through pore-scale simulation. Simulations were carried out for catalyst granules with three different sizes and a specific porosity coefficient and a specific chamber inlet pressure. The results showed that assuming constant porosity coefficient and bed inlet pressure, increasing the size of catalyst granules in a thruster leads to an increase in hydrazine decomposition equal to 8%. Moreover, by increasing the size of the catalyst granules, due to the decrease in permeability, the pressure at the end of the bed increases, which causes the mass flow rate to decrease up to 25%. Also, the decrease in mass flow rate increases the resident time, which ultimately leads to an increase in the decomposition of hydrazine and an increase in the temperature up to 5%. Finally, with the increase in the size of the catalyst granules in the specific porosity coefficient, the temperature of the outer wall increases.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۵، ۴، ۱۴۰۲. (۳۳-۴۶)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir
انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تأثیر قطر دانه‌های کاتالیست بر عملکرد محفظه تجزیه رانشگر کاتالیستی هیدرازینی*

مقاله پژوهشی

محمد رضا سلیمی[۱] حدیثه کریمایی[۲] مصطفی غلامپور یزدی[۳]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.76821.1121

چکیده *رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی، به‌طور گسترده در سامانه‌های کنترل وضعیت، انتقال مداری و اصلاح موقعیت ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این رانشگرها، تک‌پیشرانه هیدرازین، با عبور از بستر کاتالیستی و طی یک واکنش به شدت گرمازا به محصولات داغ گازی تجزیه می‌شود. در این مقاله، محفظه تجزیه یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی، در مقیاس دانه‌های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است سپس اثر پارامتر قطر دانه‌های کاتالیست روی عملکرد محفظه تجزیه با بستر کاتالیستی مورد مطالعه به طول ۲/۴۸ سانتی‌متر، مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای دانه‌های کاتالیست با قطرهای ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی‌متر در ضریب تخلخل ۰/۴ و فشار ورودی محفظه ۱۵ بار انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اندازه دانه‌های کاتالیست بر عملکرد محفظه مؤثر بوده و با افزایش آن، تجزیه هیدرازین حدود ۸٪ و دمای بستر حدود ۵٪ افزایش یافته و دبی جرمی حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد که بارگذاری بستر نیز به تبع آن حدود ۵٪ کاهش می‌یابد. در نهایت، افزایش بیشتر دمای محفظه تجزیه، سبب افزایش دمای دیواره بیرونی می‌گردد.*

واژه‌های کلیدی رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای، بستر کاتالیستی، محفظه تجزیه، قطر دانه‌های کاتالیست، هیدرازین.

Investigation of the Effect of Catalyst Granule Diameter on the Performance of Decomposition Chamber of a Hydrazine Catalytic Thruster

MohammadReza Salimi Hadiseh Karimaei Mostafa Gholampour Yazdi

Abstract *Monopropellant hydrazine thrusters are widely used in situation control, orbital transmission, and position correction systems of satellites. In these thrusters, hydrazine is decomposed into the hot gaseous products by passing through a catalyst bed during a highly exothermic reaction. In this paper, the decomposition chamber of a monopropellant hydrazine thruster is numerically simulated in the granule scale of the catalyst bed. The effect of the catalyst granule size is investigated on the performance of the decomposition chamber with catalyst bed with a length of 2.48 cm. Simulations have been performed for catalyst granules with diameters of 0.88, 1, and 1.15 mm at the porosity equal to 0.4 and the chamber inlet pressure equal to 15 bar. The results show that the size of the catalyst granules affects the chamber performance so that with its increase, the hydrazine decomposition and the bed temperature increase respectively 8% and 5% and the mass flow decreases about 25%, which in turn reduces the bed loading about 5%. Finally, further increase in the temperature of the decomposition chamber causes an increase in the outer wall temperature.*

Key Words Monopropellant thruster, Catalyst bed, Decomposition Chamber, Catalyst granule diameter, Hydrazine.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۵می‌باشد.

(۱) استادیار گروه علوم فضایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری،
(۲) نویسنده مسئول: استادیار گروه علوم فضایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری.
Email: karimaei@ari.ac.ir
(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری

مقدمه

اکثر فضاپیماها مانند راکت‌ها و ماهواره‌ها و کاوشگرهای فضایی دارای سامانه‌های پیشرانش کوچکی به منظور مانور مداری و کنترل وضعیت می‌باشند. در واقع این سامانه‌های پیشرانش، جزو زیرسامانه کنترل واکنش (RCS) (Reaction control system) فضاپیما می‌باشند. از جمله این سامانه‌های پیشرانش، رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای می‌باشند که شاخه‌ای از رانشگرهای شیمیایی مایع بوده و با توجه به میزان نیروی تراست، ضربه ویژه (Isp) و همچنین رژیم عملکردی منحصر به فردشان غالبا بیشترین کاربرد را در مأموریت‌های فضایی دارا می‌باشند و به‌طور گسترده در سامانه‌های کنترل وضعیت، انتقال مداری و اصلاح موقعیت فضاپیماها مورد استفاده قرار می‌گیرند. اجزای اصلی در این رانشگرها شامل مخزن فشارگذاری، مخزن تک‌پیشرانه، انژکتور، محفظه رانش (Thrust chamber) و نازل می‌باشد. عملکرد کلی این رانشگرها به این صورت می‌باشد که، تک‌پیشرانه مایع بعد از خروج از مخزن توسط یک انژکتور روی بستر کاتالیستی تزریق می‌شود. تک‌پیشرانه با عبور از بستر کاتالیستی و طی یک واکنش گرمازا به محصولات داغ گازی شکل تجزیه شده و در نهایت، گازهای داغ حاصل از تجزیه تک‌پیشرانه، با عبور از یک نازل همگرا–واگرا نیروی تراست تولید می‌کنند.

پرواکسید هیدروژن اولین تک‌پیشرانه مورد استفاده در رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای بود که توسط آلمان‌ها توسعه داده شد[1]. این تک‌پیشرانه بعدها به علت ضربه ویژه پایین (۱۶۵–۱۸۵ ثانیه) و مشکلات مرتبط با ذخیره‌سازی آن، توسط هیدرازین (با ضربه ویژه ۲۲۰ ثانیه) جایگزین شد. استفاده از رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای بر پایه تک‌پیشرانه هیدرازین، افق جدیدی را در دانش بشر گشوده است، که مستقیما بر اکتشاف منابع طبیعی در فضای بین سیاره‌ای و روی زمین، پیش‌بینی آب و هوا، ارتباطات رادیویی و تلویزیونی، ناوبری هوایی و دریایی تأثیرگذار بوده است. اولین تحقیق جامع در مورد مدل محاسبه، روی رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای، توسط اشمیتز و همکارانش [2] انجام شد. آن‌ها نه تنها تعداد زیادی داده تجربی برای رانشگر هیدرازینی با استفاده از کاتالیست شل ۴۰۵ (Shell405) به دست آوردند، بلکه فرمول‌هایی را نیز برای ارزیابی رفتار و پاسخ یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای استخراج کردند. در محاسبه آن‌ها، جریان در بستر کاتالیستی، با معادله Erguns مدل‌سازی شد. سپس کرستن [3,4] یک مدل عددی برای بررسی رفتار پایا و گذرای بستر کاتالیستی ایجاد و یک برنامه رایانه‌ای بر مبنای آن توسعه داد. در مدل او، انتقال جرم از جریان به سطح بیرونی دانه‌های کاتالیست و از سطح به داخل آن‌ها لحاظ شده بود. همچنین، فرض شده بود که تعادل شیمیایی و ترمودینامیکی بین گاز و دانه‌های کاتالیست وجود نداشته و از این رو معادلات انتقال جرم و انرژی برای هر دو فاز گاز و جامد تحلیل شد. در تحقیقات شنکار و همکارانش[5]، معادلات مربوط به تجزیه تک‌پیشرانه در آن به‌صورت گذرا تحلیل می‌شدند. لازم به ذکر است که آن‌ها با استفاده از این روش توانستند اثرات پارامترهایی نظیر فشار ورودی محفظه تجزیه و بارگذاری بستر (Bed loading) روی توزیع دما و گونه‌های شیمیایی را مدل-سازی کنند. همچنین آن‌ها از نتایج تجزیه و تحلیل عددی خود برای طراحی یک رانشگر ۱۰ نیوتنی استفاده کردند.

ماکلد و بلال [6] با استفاده از یک مدل ساده شده، به مطالعه یک رانشگر دو بخشی هیدرازینی پرداختند. در معادلات آن‌ها از اثرات انتقال حرارت و جرم بین جریان گاز و دانه‌های کاتالیست صرف نظر شده و انرژی واکنش‌های شیمیایی مستقیما صرف افزایش دمای گاز می‌شد. بنابراین، مدل آن‌ها یک مدل تعادلی بود که در آن دمای گاز و بستر کاتالیست برابر فرض شده بود. این موضوع سبب شده تا معادلات مربوط به فاز جامد در تحقیق آن‌ها تحلیل نشود. هوانگ و همکارانش [7] با استفاده از مدل تحلیلی شنکار و همکارانش برای ناحیه القایی و مدل یک بعدی کرستن برای ناحیه پسا القایی، اثرات تخریب شدن دانه‌های بستر کاتالیستی روی عملکرد یک رانشگر هیدرازینی را مطالعه کردند. زی و همکارانش[8] با مطالعه بر روی تک‌پیشرانه DT-3 و با شبیه‌سازی سه‌بعدی، اثرات دبی جرمی و دمای پیش‌گرمایش (Preheating temperature) و نیز طول بستر کاتالیستی، برای کنترل تراست و راه‌اندازی مجدد رانشگر را مورد بررسی قرار دادند. تک‌پیشرانه DT-3 مخلوطی از هیدرازین، نیترات هیدرازین (Hydrazine nitrate) و آب با نسبت‌های مشخص می‌باشد که خواص مشابه هیدرازین دارد. این تک‌پیشرانه ضربه ویژه بالاتری نسبت به هیدرازین داشته به علاوه این‌که حتی با دمای منفی ۳۰ درجه می‌توان از آن استفاده کرد. آن‌ها نشان دادند که بخش پایین‌دست بستر کاتالیستی دارای طول بهینه‌ای می‌باشد و کوتاه‌کردن این طول باعث می‌شود که اجزا کاملا واکنش انجام ندهند و افزایش بیش از

حد آن نیز بر تراست خروجی تأثیر می‌گذارد. سلیمی و کریمایی [9] ایجاد کاتالیزور و بستر کاتالیزوری برای تجزیه هیدرازین در رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای کم‌پیشران را مورد بحث قرار دادند. همچنین مواد تشکیل‌دهنده کاتالیست، روش‌های ساخت کاتالیست و بستر کاتالیست، ملاحظات ساخت و الزامات و همچنین جانمایی آن را مورد بررسی قرار دادند. پاکدهی و همکارانش[10] اثر تجزیه آمونیاک در یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی، بر دمای محفظه تجزیه، وزن مولکولی محصولات گازی و ضربه ویژه را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها حاکی از این بود که افزایش نرخ تجزیه آمونیاک، منجر به کاهش دما، وزن مولکولی و ضربه ویژه می‌شود.

نمازی و همکاران [11] ضریب پخش جرمی احتراق کاتالیستی متان را در محیط متخلخل متشکل از الیاف با استفاده از تحلیل مقیاس حفره محاسبه کردند. آن‌ها با تبیین وابستگی شدید کمیت حساس ضریب پخش جرمی به هندسه و آرایش گرانول‌ها در محیط متخلخل، اهمیت تحلیل در مقیاس حفره را برای استخراج این کمیت نشان دادند. سولوف و همکاران [12] فرایند شیمیایی هیدروژناسیون استیلن را در مجاورت کاتالیست پالادیوم در مقیاس حفره به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. کاتالیزور آن‌ها از فوم سلول باز بود و مقایسه نتایج آن‌ها با داده‌های تجربی دقت شبیه‌سازی‌ها را نشان داد. یکی از کاربردهای آنالیز مقیاس حفره در کاتالیست‌ها مربوط به واکنش الکتروشیمیایی در پیل‌های سوختی است که امروزه مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تحقیقات زیادی در این زمینه وجود دارد که از آن جمله می توان به مراجع [13,14] اشاره کرد.

در مقاله حاضر، محفظه تجزیه یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی، در مقیـاس دانه‌های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است. سپس اثر پارامتر قطر دانه‌های کاتالیست، روی عملکرد محفظه تجزیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، شبیه‌سازی‌ها برای دانه‌های کاتالیست با قطرهای متفاوت و با ضریب تخلخل و فشار ورودی محفظه مشخص انجام گرفته است. سپس اثرات پارامتر قطر دانه‌های کاتالیست بر روی پارامترهای عملکردی بستر کاتالیستی نظیر دبی جرمی، کسر جرمی هیدرازین، بارگذاری بستر، دمای بستر و دمای دیواره بیرونی بستر، تغییرات فشار و افت فشار بستر بررسی شده است. بررسی مقالات و پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه مطالعه رفتار محفظه تجزیه رانشگر هیدرازینی، نشان می‌دهد که در تمامی تحقیقات انجام شده، محیط متخلخل، مدل‌سازی شده است. نوآوری تحقیق حاضر در شبیه‌سازی عددی محفظه تجزیه یک رانشگر تک‌مؤلفه‌ای هیدرازینی، در مقیـاس گرانول‌های تشکیل‌دهنده بستر کاتالیستی (حفره)، است. در شبیه‌سازی در مقیاس حفره، هیچ مدل ساده شده‌ای وارد نمی‌شود و بنابراین از دقت بالایی برخوردار است.

معادلات حاکم

مسئله حاضر از دو بخش تشکیل شده است، بخش اول مربوط به تبخیر و گازی‌سازی تک‌پیشرانه بوده که در ناحیه القایی محفظه تجزیه به وقوع می‌پیوندد. در این ناحیه معادله ساده شده انرژی مطابق با تحقیق شنکار و همکارانش [5] مورد استفاده قرار گرفته و طول ناحیه به همراه خواص ترمودینامیک گاز در طول آن محاسبه می‌شوند. در بخش دوم بعد از مشخص شدن خواص جریان در انتهای ناحیه القایی، تحلیل تجزیه هیدرازین در فاز گاز روی بستر کاتالیستی انجام می‌شود. فرایند تجزیه کاتالیستی هیدرازین در یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای را می‌توان به صورت ایدئال شامل دو مرحله اصلی در نظر گرفت و از واکنش‌های میانی صرف نظر نمود. در مرحله اول، هیدرازین مایع طی یک واکنش بسیار سریع و به‌شدت گرمازا مطابق رابطه (۱) به گازهای آمونیاک و نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌گردد. گاز تولید شده در این واکنش، به دلیل تولید حجم بسیار زیاد و همچنین انبساط به دلیل وجود گرمای زیاد، باعث افزایش فشار محفظه تجزیه می‌شود. در مرحله دوم، گاز آمونیاک حاصل از تجزیه هیدرازین مایع، طی یک واکنش گرماگیر مطابق رابطه (۲) به گازهای نیتروژن و هیدروژن تجزیه می‌گردد. که سرعت واکنش مرحله دوم بسیار کمتر از سرعت واکنش مرحله اول می‌باشد. در حقیقت این واکنش، کنترل سرعت کلی را در دست دارد.

$$2N_2H_4 \rightarrow 2NH_3 + N_2 + H_2 \quad (1)$$

$$2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2 \quad (2)$$

نرخ واکنش‌های شیمیایی کاتالیستی تجزیه هیدرازین و آمونیاک به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [5]:

$$r_{N_2H_4} = A_{N_2H_4} \exp\left(-\frac{T_A^{N_2H_4}}{T_s}\right) Y_s^{N_2H_4} \quad (۳)$$

$$r_{NH_3} = A_{NH_3} \exp\left(-\frac{T_A^{NH_3}}{T_s}\right) Y_s^{NH_3} \quad (۴)$$

در معادلات فوق T_S معرف دمای سطح کاتالیست و Y_s معرف کسر جرمی گونه‌های شیمیایی در سطح کاتالیست با زمان می‌باشند. ثوابت $A_{N_2H_4}$، $T_A^{N_2H_4}$، A_{NH_3} و $T_A^{NH_3}$ نیز در جدول (۱) مشخص شده‌اند.

جدول ۱ ثابت‌های به کار رفته در معادلات آرنیوسی [5]

ردیف	ثابت	مقدار	واحد
۱	$A_{N_2H_4}$	۱/۵×۱۰^۴	یک بر ثانیه
۲	$T_A^{N_2H_4}$	۲۷۷۷/۷۸	درجه کلوین
۳	A_{NH_3}	۲/۵۳×۱۰^۱۰	یک بر ثانیه
۴	$T_A^{NH_3}$	۲۷۷۷/۷۸	درجه کلوین

انرژی فعال‌سازی و دمای فعال‌سازی تجزیه هیدرازین بسیار کمتر از تجزیه آمونیاک است، بنابراین تجزیه هیدرازین فعال‌تر است. از این رو، سینتیک تجزیه هیدرازین، فرایند احتراق کاتالیستی در داخل رانشگر را تا قبل از شروع واکنش گرماگیر تجزیه آمونیاک کنترل می‌کند. ازسوی دیگر در مدل آرنیوسی، فاکتور پیش‌نمایی A مانند یک عامل مقیاس عمل می‌کند و واحد آن 1/S می‌باشد. فاکتور پیش‌نمایی، در مقایسه با انرژی فعال‌سازی، علاوه بر نوع کاتالیست، تابعی از هندسه بستر کاتالیستی و شرایط واکنش می‌باشد.

فرم بقایی معادلات ناویر استوکس [5] در ادامه ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۵)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (۶)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i Y_k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) + \dot{\omega}_k \quad (۷)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\mu}{Pr}\left(\frac{1}{Le} - 1\right)\sum_{k=1}^{N} h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial p}{\partial t} + S_{rad} \quad (۸)$$

که در آن‌ها، Pr عدد پرانتل و Le عدد لویس می‌باشند. لازم به ذکر است که در معادلات فوق نظیر تحقیق شنکار و همکارانش [5] فرض شده که ضریب پخش تمامی گونه‌های شیمیایی برابر بوده و براین اساس تنها از یک ضریب پخش جرمی D استفاده شده است. زمانی که عدد لویس برابر یک باشد، از انتقال انرژی از طریق پخش جرمی گونه‌ها می‌توان صرف نظر کرد.

سینتیک حاکم بر مسئله با استفاده از قانون آرنیوس به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_r = AT^{\alpha} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (۹)$$

که در آن، α معرف نمای دما، E_a انرژی فعال‌سازی و R_u ثابت جهانی گازها می‌باشند. توجه شود که برای اطمینان از بقای جرم، معادلات انتقال گونه‌های شیمیایی برای N-1 گونه شیمیایی تحلیل می‌شود و کسر جرمی گونه N از بقای جرم، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{k=1}^{N} Y_k = 1 \quad (۱۰)$$

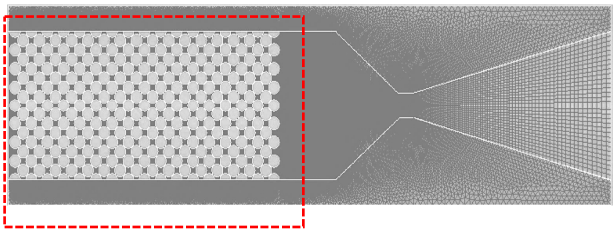
فرض بر این است که واکنش‌های شیمیایی تماما در مجاورت کاتالیست انجام می‌شوند. بنابراین، از واکنش‌های فاز گاز صرف نظر می‌شود. حال با توجه به نفوذپذیری (Permeability) بسیار پایین دانه‌های کاتالیست، انتقال جرم و حرارت در دانه‌های کاتالیست کاملا از جنس پخش در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، معادلات انتقال جرم و انرژی داخل کاتالیست به‌صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) = \dot{\omega}_k \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu}{Pr}\frac{\partial h}{\partial x_i} + \mu\left(\frac{1}{Sc} - \frac{1}{Pr}\right)\sum_{k=1}^{N} h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) \quad (۱۲)$$

مدل‌سازی

بستر کاتالیستی در این پژوهش برای تجزیه تک‌پیشرانه هیدرازین متشکل از گرانول‌های آلومینا که با فلز فعال ایریدیوم پوشش داده شده‌اند، می‌باشد. طرح‌واره بستر کاتالیستی بررسی شده در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱ طرح‌واره بستر کاتالیستی مورد پژوهش

شبیه‌سازی‌ها برای دانه‌های کاتالیست با قطرهای ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی‌متر و در ضریب تخلخل ۰/۴ انجام گرفته است. فشار ورودی به محفظه تجزیه نیز ۱۵ بار، در نظر گرفته شده است. پس از تولید هندسه فوق، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، واکنش تجزیه هیدرازین در مقیاس دانه‌های تشکیل دهنده بستر کاتالیستی شبیه‌سازی گردید. مشخصات هندسی و عملکردی محفظه تجزیه، در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات هندسی رانشگر و نیز محفظه تجزیه

ردیف	کمیت	مقدار	واحد
۱	قطر محفظه تجزیه	۱/۱۸	سانتی متر
۲	طول محفظه تجزیه	۲/۴۸	سانتی متر
۳	فشار ورودی محفظه تجزیه	۱۵	بار
۴	ضخامت دیواره	۰/۲	سانتی متر
۵	دمای تک‌پیشرانه در ورودی محفظه	۵۰۰	درجه کلوین
۶	دمای دیواره محفظه تجزیه	۳۰۰	درجه کلوین
۷	ضریب تخلخل بستر	۰/۴	-

شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن تبخیر قطرات تک‌پیشرانه هیدرازین، در ناحیه القایی، توسط مدل شنکار انجام می‌شود. لازم به ذکر است که بستر کاتالیستی در این شبیه‌سازی شامل یک بخش می‌باشد و از این نظر با تحقیق هوانگ و همکارانش که روی بستر دوبخشی صورت پذیرفته کاملا متفاوت می‌باشد.

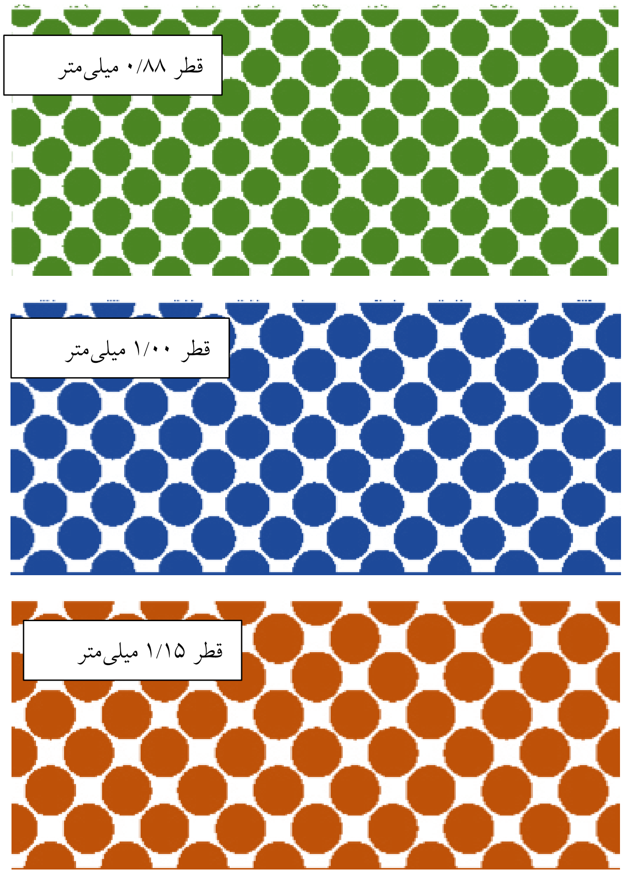
در هندسه مورد نظر بستر کاتالیستی، ضریب تخلخل در طول بستر کاتالیستی، ثابت در نظر گرفته شده و قطر دانه‌ها تغییر کرده است. ضریب تخلخل بستر ۰/۴ و قطر دانه‌ها ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی‌متر درنظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این ابعاد دانه‌ها، محدودیت ایجاد شده با توجه به کوچک بودن قطر محفظه تجزیه، به منظور ثابت ماندن ضریب تخلخل ۰/۴ می‌باشد. با توجه به دوبعدی و متقارن محوری بودن هندسه ایجاد شده، ضریب تخلخل با توجه به فرمول (۱۳) [7] محاسبه شده است.

$$\varepsilon = \frac{(\pi R^2 L) - v}{(\pi R^2 L)} \qquad (۱۳)$$

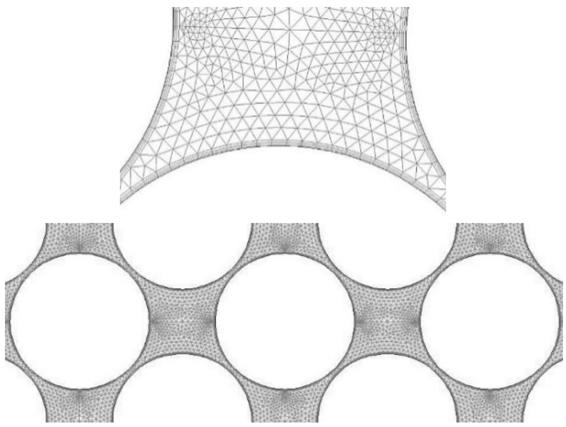
که در فرمول فوق ε ضریب تخلخل بستر و R شعاع محفظه تجزیه و L طول بستر کاتالیستی و v مجموع حجم تمامی دانه‌های بستر (چنبره‌ها) می‌باشد. هندسه و مش مسئله حاضر با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT 2.4.6 ایجاد شده است. برای ضریب تخلخل ۰/۴ تعداد مش‌های بستر، حدود ۱۶۵۵۵۴ می‌باشد. هنگامی که تعداد مش‌های بستر، حدود ۱۶۵۵۵۴ می‌شود، کسر جرمی هیدرازین و نیز سرعت محوری در انتهای بستر کاتالیستی برای ضریب تخلخل ۰/۴ با افزایش تعداد مش دیگر تغییری نمی‌کنند. لذا این تعداد مش برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. برای ضرایب تخلخل دیگر نیز به همین صورت، حداقل تعداد مش مورد نیاز انتخاب گردید. نوع شبکه‌بندی ایجاد شده نیز quad-pave می‌باشد. فاصله اولین ردیف لایه مرزی از سطح دانه‌های کاتالیست ۲ میکرون، با نرخ رشد ۱/۳ و تعداد ۴ ردیف در نظر گرفته شده است.

در شکل (۲) هندسه بستر کاتالیستی در ضریب تخلخل ۰/۴ و با قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱ و ۱/۱۵ میلی‌متر نمایش داده می‌شود. شکل (۳) نمایی از شبکه محاسباتی ایجاد شده پیرامون دانه‌های کاتالیست را نمایش می‌دهد. با توجه به این‌که در مجاورت سطح دانه‌های کاتالیست، واکنش‌های شیمیایی به وقوع می‌پیوندند، از شبکه با سازمان، و تراکم بالا استفاده شده است. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی‌ها به‌صورت دوبعدی و متقارن محوری (Axisymmetric) انجام شد. به همین دلیل شکل هندسی کاتالیست‌ها به صورت چنبره (Torus) توپر در نظر گرفته شده است که متفاوت از شکل گرانولی آن‌هاست. برای محاسبه میدان جریان، از نرم‌افزار فلوئنت ۱۷/۱ (FLUENT 17.1) با فرض ورودی گاز در ابتدا استفاده شده است. در تنظیمات نرم‌افزار، حل‌گر از نوع فشار مبنا انتخاب گردید و نیز از شرط مرزی تقارن‌محوری در سطح پایین استفاده شده است. در قسمت دیواره گرانول‌ها مدل واکنش (Reaction) در نرم‌افزار فعال شده است. به منظور فعال‌سازی واکنش‌های شیمیایی در بخش گونه‌ها (Species)، واکنش‌های حجمی و نیز سطح دیواره (Wall surface) فعال شده است. گونه‌های انتخاب شده در فاز گازی، شامل ۴ گونه هیدرازین و آمونیاک و هیدروژن و نیتروژن می‌باشند. با توجه به اهمیت بالای لایه

مرزی در دیواره گرانول‌ها، از مدل توربولانسی دو معادله‌ای کی–امگا اس اس تی (k-ω SST) استفاده شده است. روش حل نیز سیمپل–سی (SimpleC) تعیین شد و روش گسسته‌سازی برای فشار از نوع استاندارد (Standard) و برای دیگر متغیرها از نوع آپ‌ویند مرتبه دوم (Second-order upwind) انتخاب گردید.



شکل ۲ هندسه بستر ایجاد شده در ضریب تخلخل ۰/۴ و با قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی‌متر

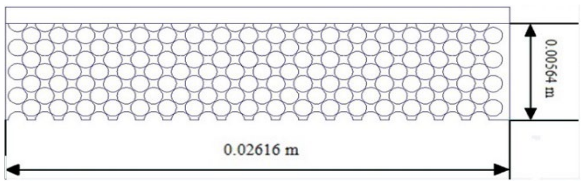


شکل ۳ شبکه محاسباتی پیرامون دانه‌های کاتالیست

حال به منظور صحه‌گذاری (Validation)، نتایج به‌دست آمده از روش عددی کار حاضر با نتایج حل عددی هوانگ و همکارانش [7] مقایسه شده است. برای بررسی صحت شبیه-سازی‌ها، نتایج تحقیق ایشان با فرض این‌که قطر دانه‌ها هم در بالادست و هم در پایین دست بستر، ۱ میلی‌متر و ضریب تخلخل نیز ۰/۴ می‌باشد و هیچ گونه تخریبی در بستر ایجاد نشده، در نظر گرفته شده است.

هندسه و ابعاد محفظه تجزیه تحلیل شده توسط آن‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. شرایط کاری این رانشگر نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

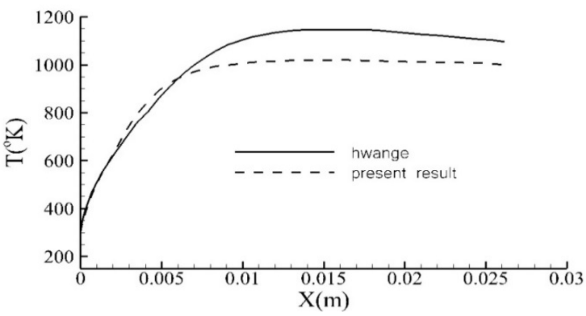
در شکل (۵) پروفیل دما در طول محفظه احتراق تحقیق حاضر با نتایج هوانگ و همککارانش [7] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج وجود دارد.



شکل ۴ هندسه و ابعاد بستر در مطالعه هوانگ و همکارانش **Error! Reference source not found.**

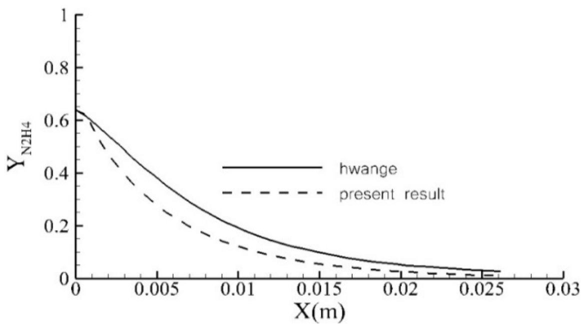
جدول ۳ شرایط کاری رانشگر هوانگ و همکارانش [7]

ردیف	کمیت	مقدار	واحد
۱	فشار ورودی	۲۶/۷	بار
۲	دمای ورودی	۳۰۰	درجه کلوین
۳	دبی جرمی	۲/۰۶	گرم بر ثانیه
۴	قطر دانه‌ها	۱	میلی‌متر
۵	ضریب تخلخل بستر	۰/۴	



شکل ۵ مقایسه پروفیل دما در طول بستر کاتالیست با نتایج هوانگ و همکارانش

پروفیل کسر جرمی گونه‌های هیدرازین نیز در شکل (۶) با نتایج عددی هوانگ و همکارانش [7] مقایسه شده است. در این نمودارها نیز مطابقت خوبی بین نتایج دیده می‌شود.



شکل ۶ مقایسه پروفیل کسر جرمی هیدرازین در طول بستر کاتالیست با نتایج هوانگ و همکارانش

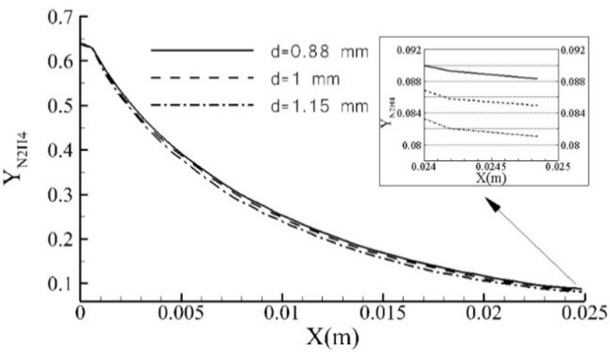
اختلافات کم مشاهده شده بین نتایج حاضر با داده‌های هوانگ و همکارانش [15] می‌تواند به چند دلیل باشد. این‌که بستر کاتالیستی در نظر گرفته شده در تحقیقات هوانگ، به عنوان یک محیط متخلخل یک‌بعدی در نظر گرفته شده است و آن محیط متخلخل در مقیاس خلل و فرج، شبیه‌سازی نشده است. همچنین دمای دیواره محفظه در تحقیق هوانگ مشخص نبوده اما در این تحقیق برابر ۲۹۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. همچنین در دیواره‌ها فقط انتقال حرارت تشعشعی در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

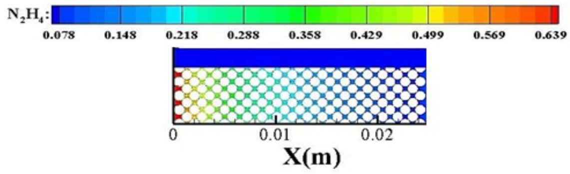
در این بخش اثر پارامتر قطر دانه‌های تشکیل‌دهنده بستر کاتالیستی بر پارامترهای مختلف عملکردی بستر کاتالیستی نظیر دبی جرمی، کسر جرمی هیدرازین، بارگذاری بستر، دمای بستر و دمای دیواره بیرونی بستر، تغییرات فشار و افت فشار بستر بررسی شده است. در این خصوص، ضریب تخلخل معادل ۰/۴ در نظر گرفته شده است. زیرا در این ضریب تخلخل، هیدرازین در طول بستر به طور کامل تجزیه شده و دلیل این مسئله نیز بیشتر بودن سطح تماس و در نتیجه افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی در این ضریب تخلخل می‌باشد. برای ارزیابی اثرات قطر دانه‌های کاتالیست نیز سه اندازه دانه با اندازه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی‌متر مورد نظر قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی‌ها برای فشار ورودی ۱۵ بار انجام گرفته‌اند.

کسر جرمی هیدرازین

در شکل (۷) مقایسه کمی پروفیل‌های کسر جرمی هیدرازین، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵ میلی-متر، در فشار ورودی محفظه ۱۵ بار نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ضریب تخلخل ۰/۴ با افزایش قطر دانه‌های کاتالیست، به دلیل افزایش سطح تماس، کسر جرمی هیدرازین در انتهای بستر، به میزان کمی کاهش یافته است. در شکل (۸) نیز کانتور نرخ تجزیه هیدرازین در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه ۱ میلی‌متر و فشار ورودی محفظه ۱۵ بار ارائه شده است. تجزیه هیدرازین با توجه به میزان انتقال هیدرازین به دانه‌های کاتالیست کنترل می‌شود، زیرا با رسیدن به سطح کاتالیست به سرعت تجزیه می‌شود. کسر جرمی هیدرازین (N2H4 mass fraction) نیز در طول بستر کاتالیستی به‌صورت نمایی افت می‌کند. شایان ذکر است که، نرخ واکنش تجزیه هیدرازین در این تحقیق، محدود به بخش بسیار نازکی از جداره دانه‌های کاتالیست می‌شود. بنابراین نرخ واکنش‌های شیمیایی در این حالت بسیار بیشتر از نرخ انتقال جرم از جریان سیال به سطح کاتالیست و از سطح کاتالیست به داخل آن می‌باشد. به‌طوری که، هیدرازین قبل از این‌که به داخل دانه‌های کاتالیست منتشر شود، کاملا تجزیه شده و از بین می-رود؛ لذا واکنش تجزیه کاتالیستی هیدرازین در شرایط مطالعه شده در این تحقیق توسط پخش مولکولی (انتقال جرم) کنترل می‌شود.



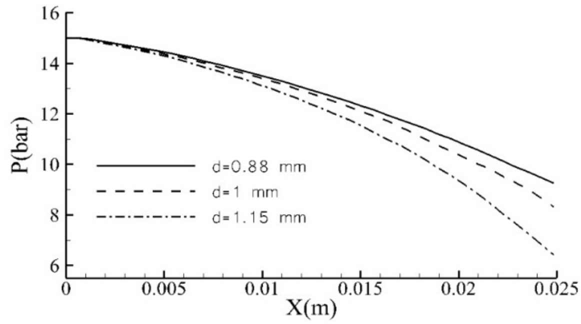
شکل ۷ کسر جرمی هیدرازین در ضریب تخلخل ۰/۴ و با اندازه دانه‌های متفاوت در فشار ورودی محفظه ۱۵ بار



شکل ۸ کانتور نرخ تجزیه هیدرازین، دانه‌ها با قطر ۱میلی‌متر در ضریب تخلخل ۰/۴ و فشار ورودی محفظه ۱۵ بار

فشار داخل محفظه

شکل (۹) مقایسه کمّی پروفیل‌های تغییرات فشار داخل محفظه، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر، در فشار ورودی ۱۵ بار را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر دانه‌های کاتالیست، به دلیل افزایش سطح تماس و در نتیجه افزایش مقاومت محیط متخلخل، افت فشار نیز افزایش یافته است.



شکل ۹ تغییرات فشار داخل محفظه در ضریب تخلخل ۰/۴ و با اندازه دانه‌های متفاوت در فشار ورودی محفظه ۱۵ بار

افزایش افت فشار از میان بستر کاتالیستی اثرات نامطلوبی در عملکرد یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی خواهد داشت. به دلیل افت فشار، دانه‌های کاتالیستی که در انتهای بستر کاتالیستی واقع شده‌اند از لحاظ مکانیکی دچار شکسته شدن می‌شوند که این موضوع باعث کاهش عمر کاری رانشگر خواهد شد. به این دلیل است که در رانشگرها، بستر کاتالیستی، دوبخشی طراحی می‌شود تا بدون این‌که واکنش‌پذیری بستر دچار کاهش شود، افت فشار به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کند.

در جدول (۴) تغییرات افت فشار در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر، در فشار ورودی ۱۵ بار ارائه شده است. با فرض ثابت بودن ضریب تخلخل و نیز فشار ورودی، با کاستن از قطر دانه‌های کاتالیست، به دلیل کاهش مقاومت محیط متخلخل، میزان افت فشار نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۴ افت فشار در ضریب تخلخل ۰/۴ و اندازه دانه‌های متفاوت در انتهای بستر کاتالیستی در فشار ورودی محفظه ۱۵ بار

فشار در انتهای بستر (بار)	قطر ذرات کاتالیست (میلی‌متر)
۹/۲۸	۰/۸۸
۸/۲۳	۱
۶/۴۶	۱/۱۵

دبی جرمی

جدول (۵) تغییرات دبی جرمی، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر، در فشار ورودی ۱۵ بار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش قطر دانه‌های کاتالیست، به دلیل افزایش مقاومت محیط متخلخل و در نتیجه افت فشار بیشتر، دبی جرمی کاهش یافته است. پایین آمدن دبی جرمی باعث افزایش زمان ماند (Resident time) خواهد شد که در نهایت منجر به افزایش تجزیه هیدرازین و افزایش دما خواهد شد. بنابراین با افزایش اندازه کاتالیست (در ضریب تخلخل یکسان)، می‌توان انتظار داشت که مصرف تک‌پیشرانه رانشگر کاهش یابد.

جدول ۵ تغییرات دبی جرمی در ضریب تخلخل ۰/۴ و اندازه دانه‌های مختلف و فشار ورودی ۱۵ بار

دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	قطر ذرات کاتالیست (میلی‌متر)
۰/۰۰۲۳	۰/۸۸
۰/۰۰۲۱	۱
۰/۰۰۱۷	۱/۱۵

بارگذاری بستر

یکی از پارامترهای مهم برای طراحی محفظه تجزیه، بارگذاری بستر (G) می‌باشد. با افزایش بارگذاری بستر طول ناحیه القایی افزایش یافته و در ورودی ناحیه پسا القایی، دمای مخلوط گازی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش این پارامتر، میزان بیشینه دما نیز کمی از ورودی محفظه تجزیه دور می‌شود. رابطه (۱۴) [7] معرف کمیت بارگذاری بستر می‌باشد:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه A برابر مساحت مقطع عرضی محفظه تجزیه، می‌باشد. با توجه به رابطه فوق، طبیعی است که منحنی بارگذاری بستر، رفتاری مشابه با دبی جرمی داشته باشد. جدول (۶) تغییرات بارگذاری بستر، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر، در فشار ورودی ۱۵ بار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش قطر دانه‌های کاتالیست و به دلیل افت فشار بیشتر و کاهش دبی جرمی، بارگذاری بستر نیز کاهش یافته است.

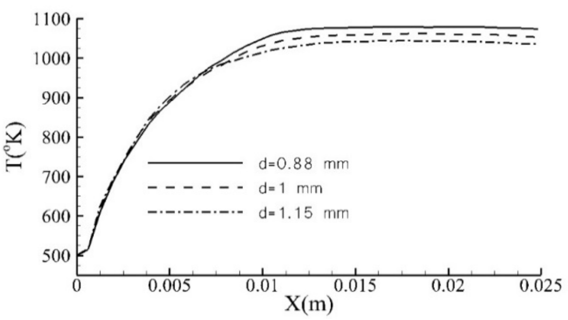
جدول ۶ تغییرات بارگذاری بستر در ضریب تخلخل ۰/۴ و اندازه دانه‌های مختلف و فشار ورودی ۱۵ بار

بارگذاری بستر (kg/m^2s)	قطر ذرات کاتالیست (میلی‌متر)
۲۰/۹۵	۰/۸۸
۱۹/۲۷	۱
۱۵/۵۸	۱/۱۵

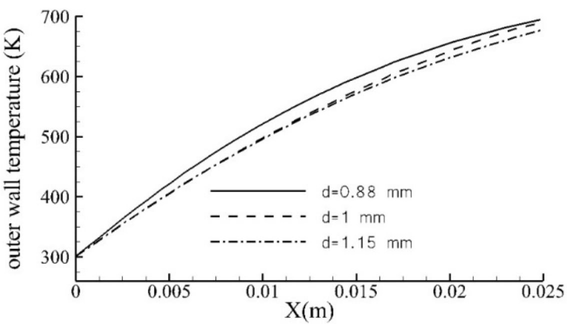
دمای بستر و دیواره بیرونی

در فرایند تجزیه کاتالیستی هیدرازین در یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای، در ابتدای محفظه تجزیه، گرمای حاصل از تجزیه هیدرازین بیشتر از تجزیه آمونیاک است و بنابراین واکنش، گرمازا خواهد بود. لذا تا زمانی که تجزیه گرماگیر آمونیاک واکنش را کنترل کند، دمای بستر افزایش می‌یابد و بعد از آن دما در منطقه تحت سلطه تجزیه آمونیاک کاهش خواهد یافت. شکل (۱۰) مقایسه کمی پروفیل‌های تغییرات دما، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر و در فشار ورودی ۱۵ بار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشینه دمای بستر با افزایش اندازه دانه‌های کاتالیست، به طور جزئی تا حدود ۵٪ افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع نیز آزادسازی سریع‌تر انرژی تک‌پیشرانه می‌باشد که بر ساز و کار انتقال حرارت به بدنه محفظه غلبه کرده و باعث افزایش دمای محصولات برای دانه‌های کاتالیست با قطر بیشتر شده است. این میزان افزایش دما، با بالا بردن فشار ورودی تک‌پیشرانه نیز افزوده شده است. از آن‌جا که تجزیه آمونیاک گرماگیر است، پس از کم شدن تجزیه هیدرازین، دما نیز کاهش یافته است.

از آنجایی که در رانشگرهای تک‌پیشرانه‌ای هیدرازینی به طور معمول هیچ گونه خنک‌کاری انجام نمی‌شود، لذا می‌بایست رانشگر به‌صورتی طراحی شود که میزان گرمای انتقال‌یافته به قسمت‌هایی که هیدرازین در آن به‌صورت راکد می‌باشد، کاهش یابد[16]. بنابراین جهت طراحی سازه رانشگر، تعیین ضخامت و جنس دیواره بسیار مهم می‌باشد. به این منظور نیاز به تعیین دمای بیرونی دیواره در طول رانشگر می‌باشد. شکل (۱۱) تغییرات دمای دیواره بیرونی تا حدود ۵٪، در ضریب تخلخل ۰/۴ و قطر دانه‌های ۰/۸۸، ۱، ۱/۱۵میلی‌متر و در فشار ورودی ۱۵ بار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که بیشینه دمای دیواره بیرونی در حالت استفاده از دانه‌های با قطر بزرگ‌تر می‌باشد. دلیل این موضوع نیز، افزایش سطح تماس دانه‌های با قطر بزرگ‌تر و تجزیه بیشتر هیدرازین و افزایش دمای بستر می‌باشد.



شکل ۱۰ تغییرات دما در ضریب تخلخل ۰/۴ و با اندازه دانه‌های متفاوت و در فشار ورودی ۱۵ بار



شکل ۱۱ تغییرات دمای دیواره بیرونی در ضریب تخلخل ۰/۴ و با اندازه دانه‌های متفاوت و در فشار ورودی ۱۵ بار

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تجزیه تک‌پیشرانه هیدرازین روی بستر کاتالیستی متشکل از گرانول‌های آلومینا که با فلز فعال ایریدیوم پوشش داده شده‌اند در یک رانشگر تک‌پیشرانه‌ای، از طریق شبیه‌سازی در مقیاس حفره‌ها، تحلیل گردید. از این طریق، امکان مطالعه پارامترهای مربوط به بستر کاتالیستی که از مهم‌ترین آن‌ها ابعاد دانه‌های کاتالیست می‌باشد بر روی پارامترهای عملکردی بستر

فراهم گردید. شبیه‌سازی‌ها برای دانه‌های کاتالیست با سه اندازه مختلف و در یک ضریب تخلخل مشخص و فشار ورودی محفظه مشخص انجام گرفته است. نتایج نشان داد که با فرض ثابت بودن ضریب تخلخل و فشار ورودی بستر، افزایش اندازه دانه‌های کاتالیست در یک رانشگر، منجر به افزایش تجزیه هیدرازین به میزان ۸٪ خواهد شد. همچنین با افزایش اندازه دانه‌های کاتالیست، به دلیل کاهش نفوذپذیری، میزان تغییرات فشار در انتهای بستر افزایش می‌یابد که باعث می‌شود دبی جرمی تا ۲۵٪ کاهش یابد. دلیل دیگر این است که با افزایش اندازه دانه‌های کاتالیست، به دلیل افزایش مقاومت محیط متخلخل و در نتیجه افت فشار بیشتر، دبی جرمی کاهش می‌یابد. همچنین پایین آمدن دبی جرمی باعث افزایش زمان ماند خواهد شد که در نهایت منجر به افزایش تجزیه هیدرازین و افزایش دما تا ۵٪ خواهد شد. به دلیل همین کاهش دبی جرمی، بارگذاری بستر نیز به تبع آن تا ۵٪ کاهش می‌یابد. در نهایت لازم به ذکر است که با افزایش اندازه دانه‌های کاتالیست در ضریب تخلخل مشخص، به دلیل افزایش سطح و تجزیه بیشتر هیدرازین و افزایش بیشتر دمای محفظه تجزیه، دمای دیواره بیرونی، افزایش می‌یابد.

واژه نامه

زیرسامانه کنترل واکنش	Reaction control system (RCS)
محفظه رانش	Thrust chamber
کاتالیست شل ۴۰۵	Shell405
ارگانز	Erguns
بارگذاری بستر	Bed loading
دمای پیش‌گرمایش	Preheating temperature
نیترات هیدرازین	Hydrazine nitrate
نفوذپذیری	Permeability
گمبیت	GAMBIT
متقارن محوری	Axisymmetric
چنبره	Torus
فلوئنت	FLUENT
واکنش	Reaction
گونه‌ها	Species
سطح دیواره	Wall surface
کی–امگا اس اس تی	k-ω SST
سیمپل–سی	SimpleC
استاندارد	Standard
آپ‌ویند مرتبه دوم	Second-order upwind
صحه‌گذاری	Validation
کسر جرمی	mass fraction
زمان ماند	Resident time

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] N. S. Davis, and J. H. Keefe ,"Concentrated Hydrogen Peroxide as a Propellant", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol.48, no. 4, pp.745-748, 1956.

[2] B. W. Schmitz, ; W.W. Smith, D.A. Williams, and D. Maybee, Design and Scaling Criteria for Monopropellant Hydrazine Rocket Engines and Gas Generators Employing Shell 405 Catalyst; in: *AIAA Second Propulsion Joint Specialist Conference*, Colorado Springs, Colorado, 1966.

[3] A. S. Kersten, Analytical Study of Catalystic Reactors for Hydrazine Decomposition; Technical Report, NASA UARL G. pp. 7-458. 1969,

[4] A.S. Kersten, Analytical and Experimental Studies of the Transient Behaviour of Catalytic Reactor for Hydrazine Decomposition; *Technical Report, NASA UARL C.*, 459-960, 1967.

[5] V. Shankar, A.K Anantha Ram and K. A. Bhaskaran, "Prediction of the Concentration of Hydrazine Decomposition Products Along a Granular Catalystic Bed"; *Acta Astronautica*. vol.11, no. 6, pp. 287–299. 1984.

[6] A. E. Makled, H. Belal, Modeling of Hydrazine Decomposition for Monopropellant Thrusters; *13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology*. 2009.

[7] CH. Hwang, S.N. Lee, S.W. Baek, C.Y. Han, S.K. Kim and M.J. Yu, "Effects of Catalyst Bed Failure on Thermo Chemical Phenomena for a Hydrazine Monopropellant Thruster Using Ir/Al2O3 Catalysts", *Industrial & Engineering Chemistry Research,* no. 51, pp. 5382–5393, 2012.

[8] Z.G. Gao, G.x. Li, T. Zhang, X. Liu, Z. Wang and X. Liu, "Numerical Simulation for the Decomposition of DT-3 in a Monopropellant Thruster", *Aerospace Science and Technology* , vol. 74, no. 1, pp. 132-144, 2018.

[9] M.R. Salimi, H. Karimaei, "Making Catalyst and Preparing Catalyst Bed for Hydrazine Decomposition in Low-Thrust Monopropellant Thrusters", *Technology in Aerospace Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 17-25, 2019. (In Persian)

[10] Sh. Pakdehi, F. Shirvani, R. Zolfaghari, "A Thermodynamic Study on Catalytic Decomposition of Hydrazine in a Space Thruster", *Archives of Thermodynamics*, vol.40, no. 4, pp. 10-20. 2019.

[11] M. Namazi, M. Nayebi, A. Isazadeh, , A. Modarresi, I.G. Marzbali, and S.M. Hosseinalipour, "Experimental and numerical study of catalytic combustion and pore-scale numerical study of mass diffusion in high porosity fibrous porous media", *Energy*. vol. 238, no. 1, 121831-9. 2022.

[12] S.A. Solovev, O.V. Soloveva, I.G. Akhmetova, Y.V. Vankov, and D.L. Paluku , "Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Open-Cell Foam Catalyst on Example of the Acetylene Hydrogenation Reaction", *Chemical Engineering*. vol. 6, no.1, pp. 11-19, 2022.

[13] L. Chen, R. Zhang, Q. Kang, and W.Q. Tao, "Pore-scale study of pore-ionomer interfacial reactive transport processes in proton exchange membrane fuel cell catalyst layer", *Chemical Engineering Journal*., vol. 391, no. 1, pp.123590-9. 2020.

[14] M. Farzaneh, H. Ström, F. Zanini, S. Carmignato, S. Sasic and D. Maggiolo, "Pore-scale transport and two-phase fluid structures in fibrous porous layers: Application to fuel cells and beyond", *Transport in Porous Media*., vol.136, no.1, pp. 245-270. 2021.

[15] C.H. Hwang, S.W. Baek, S.J. Cho, "Experimental Investigation of Decomposition and Evaporation Characteristics of HAN-Based Monopropellants", *Combustion and Flame*, vol. 161, no. 4, pp. 1109–1116. 2014.

[16] Z.G. Gao, G.X. Li, T. Zhang, X.H. Liu, Z.H. Wang, X. Liu, "Numerical simulation for the decomposition of DT-3 in a monopropellant thruster", *Aerospace Science and Technology*., vol. 74, no.1, pp. 132-144, 2018.